

Puun läpikuultavuus

Tutkimus valon kulkemisesta puun lävitse

Janne Pärssinen
Materiaalitutkimus
Muotoilun koulutusohjelma
Muotoilun laitos
Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu
Aalto-yliopisto
6.4.2016

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkoituksena oli selvittää miten tekijät, kuten puulaji, syyn suunta valoon nähden ja tiheys vaikuttavat puun läpikuultavuuteen. Lisäksi tavoitteena oli osoittaa kuinka valon väri muuttuu valon läpäistessä puuta.

Tutkimusta varten valmistettiin sarjat kappaleita kolmesta puulajista; saarnista, koivusta ja kuusesta. Jokaisesta puulajista valmistettiin sarjat kappaleita kahdessa eri syysuunnassa ja noin kymmenessä paksuudessa. Koetta varten tehtiin järjestely, jossa led-valo paistaa pöytätasossa olevasta reiästä tutkittavan kappaleen läpi.

Selkeistä valokuvasarjoista pystyy arvioimaan miltä kukin sarja kappaleita näyttää valon läpäistessä ne samoissa olosuhteissa ja miten valon väri muuttuu kappaleesta toiseen. Lisäksi vertailevaa tietoa puulajeista hankittiin valomittarilla, jonka tuloksista rakennettiin havainnollisia kuvaajia. Tutkimuksessa yllättävänkin paksuisista kappaleista tuli syyn suuntaisesti valo läpi. Läpikuultavin laji oli kuusi, josta valo tuli läpi parhaimmillaan 2 senttimetrin kappaleesta. Tutkimuksen tuloksia voi hyödyntää erilaisissa puun ja valon yhdistämiseen liittyvissä projekteissa.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
Sisällysluettelo	2
1 Johdanto	3
2 Menetelmä	3
2.1 Koejärjestely	3
2.2 Mittaustavat	4
2.3 Mitattavat kappaleet	4
3 Tulokset	6
3.1 Saarni	6
3.2 Koivu	7
3.3 Kuusi	9
3.4 Puulajien vertailua	11
4 Pääteelmät	11
Lähdeluettelo	12
Liitteet	13

1 Johdanto

Tutkimuksen lähtökohta on tutkia miten valo kulkeutuu puun läpi ja mitkä asiat vaikuttavat siihen. Tutkimuksessa selvitetään myös miten valon väri muuttuu puun läpäistessään. Tutkimuksen tuloksia voi hyödyntää esimerkiksi valaisimien ja sisustuksellisten elementtien suunnittelussa.

Lähtökohtaisena hypoteesina oli, että puun syyn suunta valoon nähden ja tiheys vaikuttavat valon läpäisyyn. Oletin, että yli sentin paksuisista kappaleista valo ei enää mene läpi. Myös puun kosteuden ja tummuuden ajattelin voivan olla vaikuttavia tekijöitä. Erilaisilla puun käsittelyillä ajateltiin voivan vaikuttaa puun kosteuteen ja siten läpikuultavuuteen, mutta sitä ei tässä tutkimuksessa kokeiltu.

Tutkimus rajattiin kolmeen puulajiin; saarniin, koivuun ja kuuseen. Tutkimukseen oli tärkeitä saada yleisesti käytettyjä puulajeja, ja että joukossa on sekä lehti-, että havupuita. Syysuunnan vaikutuksen selvittämiseksi koekappaleet tehtiin kahdessa syysuunnassa, joista toisessa valo kulkee syyn suuntaisesti ja toisessa syyhyn nähden 90 asteen kulmassa. Jokaisesta puulajista tehtiin sarja eri paksuisia kappaleita molemmissa syysuunnissa.

Keskeiseksi tutkimusmenetelmäksi läpikuultavuuden selvittämiseen käytettiin valokuvausta. Lisäksi tutkimuksessa käytetään valomittaria tarkemman vertailutiedon saamiseksi.

2 Menetelmä

2.1 Koejärjestely

Koejärjestelyssä puukappaleet asetettiin samalle etäisyydelle valonlähteestä valokuvausta ja mittauksia varten.

Järjestelyssä valonlähde asetettiin osoittamaan suoraan ylöspäin. Valonlähteestä 15 senttimetrin korkeudelle asetettiin taso, johon oli porattu halkaisijaltaan 35 millimetrin reikä. Reiän tarkoitus oli rajata valo ainoastaan koekappaleen kohdalle. Koekappaleet asetettiin tasopinnalle niin, että reikä jää kokonaan kappaleen alle.

Järjestelmäkamera asetettiin jalustalle noin 40 cm etäisyydelle koekappaleista, 90 asteen kulmassa. Värimittaria pidettiin käsin mitattavan kappaleen pinnalla.

Koetilassa valaistus oli likimain staattinen, mutta huoneessa ei ollut täysin pimeää koetilanteen helpottamiseksi. Valonlähteenä käytettiin led paneeleita,

valokuvaukseen käytettiin pienempää mini led-paneelia ja valomittaukseen suurempaa studiokäyttöön tarkoitettua led-paneelia.

2.2 Mittaustavat

Kappaleiden läpikuultavuutta tutkittiin valokuvaamalla ja valomittarilla mitaten. Valokuvista hyötynä vertailevan tiedon ja dokumentaation lisäksi saatiin

Valokuvauksessa tärkeää oli saada vertailukelpoiset kuvat kaikista kappaleista. Alkuperäinen suunnitelma oli kuvata jokainen kappale samoilla valotusasetuksilla, mutta se osoittautui huonoksi ajatukseksi, sillä silloin suurin osa kuvista joko yli- tai alivaloittui. Ratkaisu oli kuvata kaikki kuvat muuten pysyvillä valotusarvoilla, mutta muuttaa valotusaikaa tarpeen mukaan, jotta jokaisesta kappaleesta saatiin hyvä ja todenmukainen kuva. Käytetyt valotusarvot olivat aukko $f/2.0$ ja herkkyys ISO 250. Valotusaika vaihteli vaaleimpien kappaleiden $1/1600$ s ja tummimpien kappaleiden $1/50$ s välillä.

Valomittari, jota tutkimuksessa käytettiin oli Gigahertz-merkinen laite BTS256-EF. (Kuva 1.) Mittarilla pystyi muiden tietojen muassa selvittämään valon intensiteetin ja aallonpituusjakauman. Mittaukset toteutettiin asettamalla mittaava sensori (Kuva 1. valkoinen ympyrä) mittaushetkellä kappaleen pinnalle ja suorittamalla mittaus. Laite oli kytkettynä tietokoneeseen, johon tallennettiin jokaisen mittauksen data.

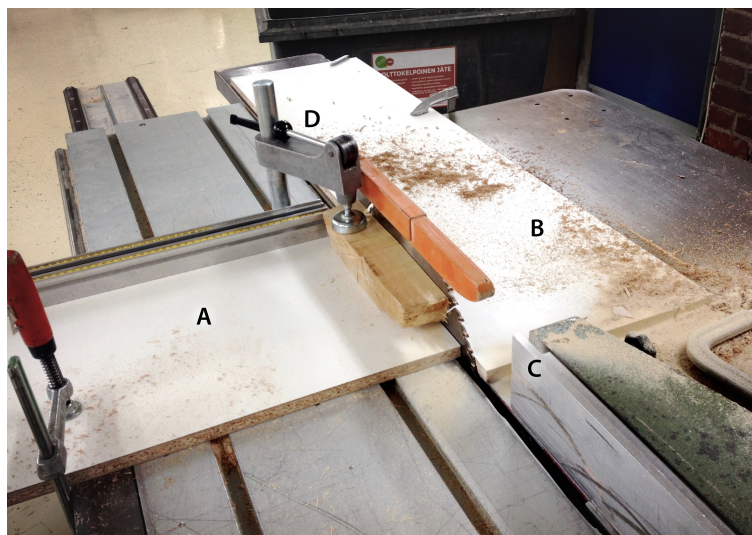
Puun läpikuultavuuden tutkimuksessa hyödyllisintä valomittarin antamaa tietoa olivat erityisesti valon intensiteetti lux-yksikössä ja aallonpituusjakaumat. Värien muutosta pystyy tarkastelemaan aallonpituuskäyrästä ja valon intensiteetti-tiedot antaa mahdollisuuden vertailla puulajeja ja kappaleita niiden valon läpäisyn suhteen.

2.3 Mitattavat kappaleet

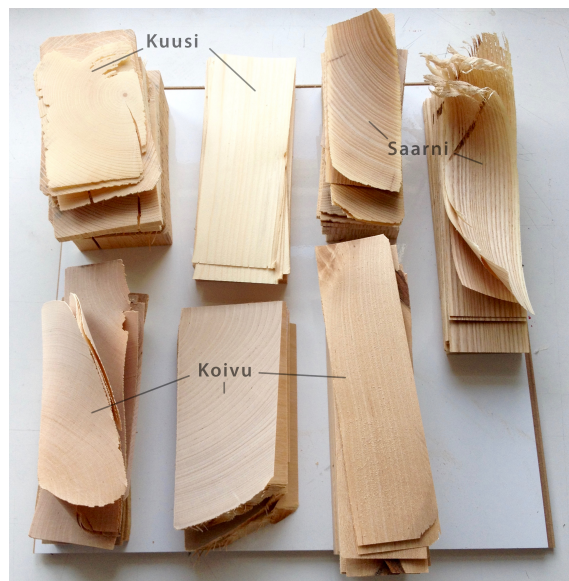
Mitattavien kappaleiden valmistamiseen oli monia vaihtoehtoja. Epäilyyn puun kosteuden ja muiden mahdollisten muuttujien vuoksi päädyin tekemään jokaisen puulajin koesarjan yhdestä puun palasta, jolloin kappaleet ovat samasta puusta ja mahdollisimman läheltä toisiaan. Valmiiden viilujen käyttäminen olisi ollut helpompi vaihtoehto, mutta tulokset eivät tällöin olisi olleet niin vertailukelpoisia.



Kuva 1. Gigahertz BTS256-EF valomittari



Kuva 2. Sirkkelin järjestely kappaleiden leikkausta varten



Kuva 3. Koesarjat

Koekappaleet valmistettiin lopulta sirkkelillä leikkaamalla. Jotta sirkkelillä pystyy leikkaamaan hyvin ohuita kappaleita tarkasti, täytyy tehdä muutamia järjestelyitä. Sirkkelin terän molemmille puolille tulee asettaa levyt korotetuksi pöytätasoksi, jotta leikatut kappaleet eivät putoa sirkkelin sisäpuolelle. (Kuva 2. A ja B) Levyjen tulee olla joko saman korkuisia tai levyn B hieman ohuempi. Pitkittäissuuntainen ohjuri tulee turvallisuussyistä viedä pois terän kohdalta. (Kuva 2. C) Ohjurilla voi kuitenkin mitata leikattavan kappaleen. Lisäksi kappale kannattaa tarkkuuden ja turvallisuuden vuoksi kiinnittää puristimella sirkkelitasoon. (Kuva 2. D)

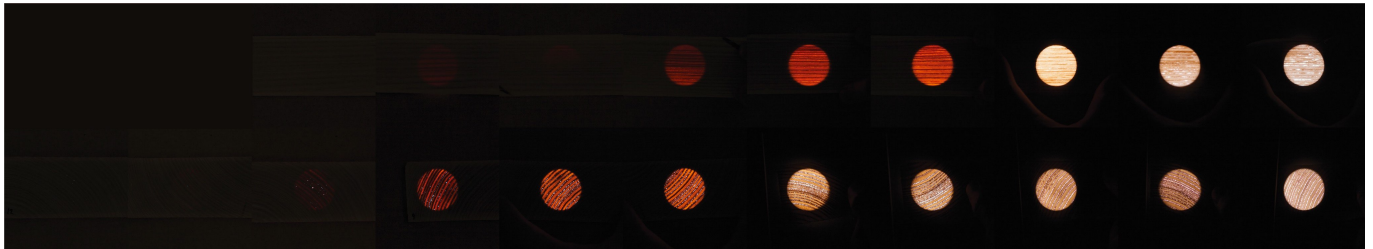
Puulajien valinta tähän tutkimukseen perustui ensinnäkin saatavuuteen, mutta myös siihen, että valittujen lajien tulisi olla yleisessä käytössä. Halusin kokeilla sekä havu-, että lehtipuita. Myös puulajien tiheyden oletettiin vaikuttavan tuloksiin. Puun tiheys kuitenkin on hieman ongelmallinen käsite, sillä se riippuu puun kosteudesta ja myös vaihtelee paljon yksittäisen palan sisällä. Kuitenkin kuivana mitatun taulukkotiedon perusteella voi olettaa, että lehtipuista saarni on aavistuksen verran koivua tiheämpää. Molemmat lehtipuut ovat kuitenkin tiheämpiä kuin kuusi. (Taulukko 1.)

Taulukko 1. Puulajien tiheydet kuivana mitattuna, The Engineering Toolbox

Laji	Tiheys 10^3 kg/m^3
Saarni	0,71
Koivu	0,67
Kuusi	0,45

3 Tulokset

3.1 Saarni

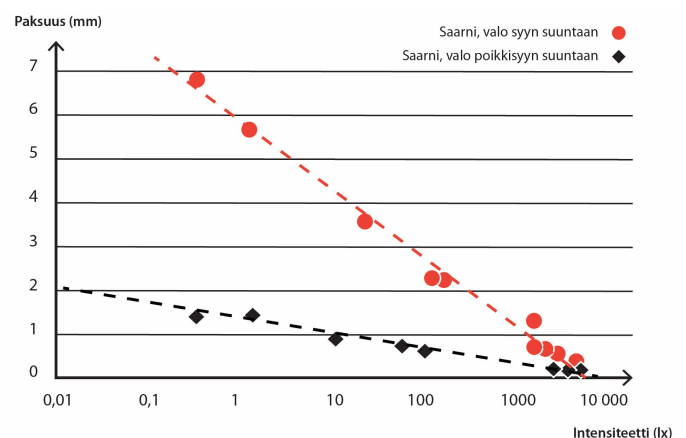


Kuva 4. Valokuvat saarnista

Kuvassa 4 on koko sarja Saarnen eri paksuuksia molemmissa syysuunnissa. Kuvat ovat järjestetty niin, että ylärivissä valo kulkee poikittain syihin nähden ja alarivissä syyn suuntaisesti. Kappaleiden paksuus ohenee oikealle vasemmalle mentäessä, mutta ylä- ja alarivien paksuudet eivät vastaa toisiaan, vaan alarivin kappaleet ovat hieman paksumpia. Muiden puulajien vastaavat kuvat ovat samalla tavalla jaoteltu. Tarkemmat tiedot yksittäisten kappaleiden paksuuksista voi löytää liitteenä olevasta taulukosta.

Saarnelle ominaista on vahva syykuvio. Tummat kesäpuun renkaat päästävät valoa huonommin lävitse kuin leveämmät vaaleat kevätpuun renkaat lukuun ottamatta syissä olevia reikiä. Kevätpuu on kaikilla puulajeilla tyypillisesti solurakenteeltaan harvempaa kuin kesäpuu. (Saranpää, 2005, s. 8) Kuten valokuvista voi nähdä, kesäpuun kohdalla puussa on varsin suuria syyn suuntaisia reikiä, josta valo pääsee suoraan paistamaan läpi. Nämä onkalot ovat myös havaittavissa valon paistaessa poikkisyyn suuntaisesti, ohuimmissa kappaleissa läpi asti olevina reikinä ja paksummissa ohuina vaaleina raitoina. (Kuva 4)

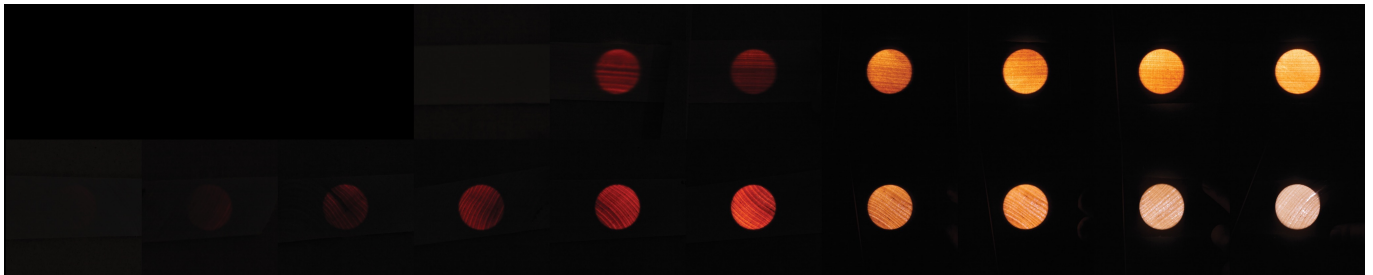
Saarnessa, kuten kaikissa muissakin lajeissa valo kulki parhaiten syyn suuntaisesti. Tämä ilmiö johtuu siitä, että puun solurakenteessa olevat onkalot kulkevat nimenomaan syiden suuntaisesti. Kuviosta 1 huomaa, että erittäin ohuissa kappaleissa läpikuultavuuserot ovat vähän pienempiä. Kuvion logaritminen asteikko kuitenkin vaikeuttaa ohuimpien ja siten kirkkaimpien kappaleiden vertailua.



Kuvio 1. Saarnen läpäisseen valon intensiteetti paksuuden funktiona

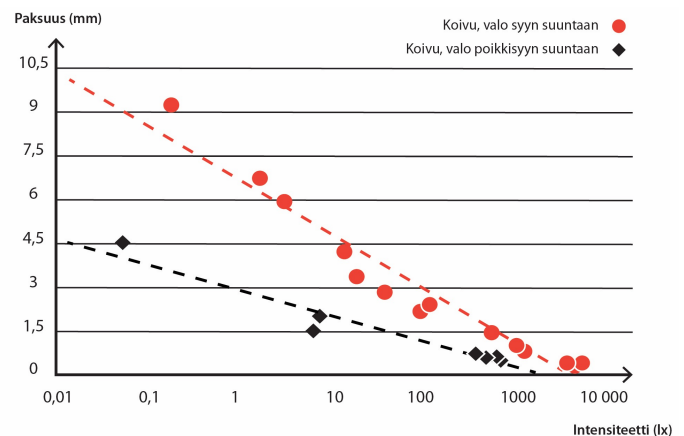
Valon värin muutos saarnessa ei muodosta samanlaista siistiä liukuväriä ohuimmasta paksuimpaan kuin muut kokeillut lajit. Ohuemmista kappaleista läpi päässyt valo oli hyvin kellertävää ja paksummista kappaleista taas vahvan oranssin punaista. Tummat syyrenkaat estävät lähes kaiken valon pääsyn lävitseen ja muodostavat mielenkiintoisen raitakuvion kaikkiin kappaleisiin ohuimmasta paksuimpaan. Saarnen värin mittauksesta saadut aallonpituuskäyrät ovat liitteenä.

3.2 Koivu



Kuva 5. Valokuvat koivusta

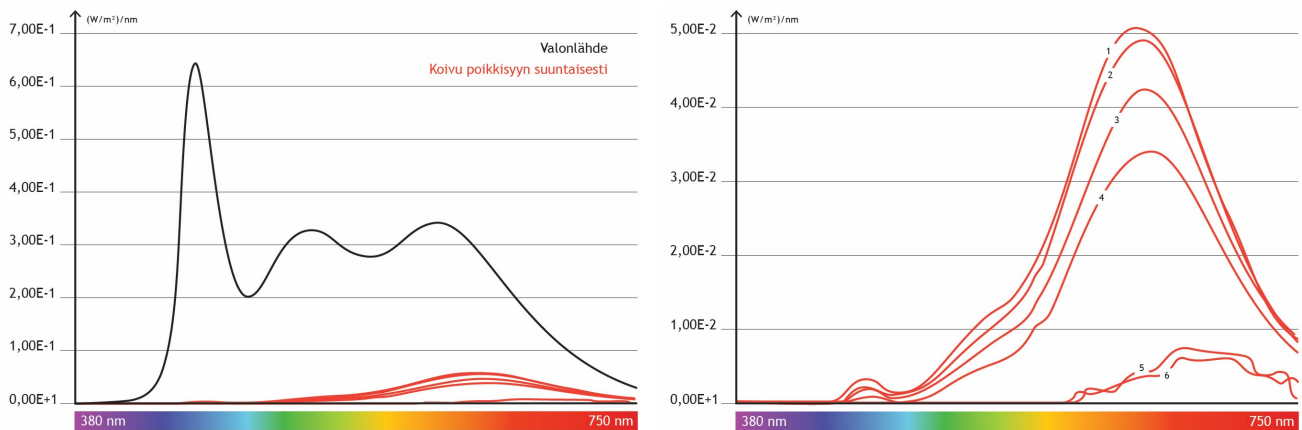
Koivu yllätti testeissä läpikuultavuudellaan, sillä oletamus oli, että tiiviinä puulajina tunnettu koivu päästäisi huonosti valoa lävitse. Voi olla, että koivun vaaleus helpottaa valon läpäisyä. Kuvioista 2 huomaa jälleen kuinka valo läpäisee puun syyn suuntaisesti yli kaksi kertaa paremmin kuin poikittain syyyhyn nähden. Koivun poikkisyyn suuntainen valonläpäisy vaikuttaisi olevan silti suhteessa syynsuuntaiseen parempi kuin muilla kokeessa mukana olleilla lajeilla.



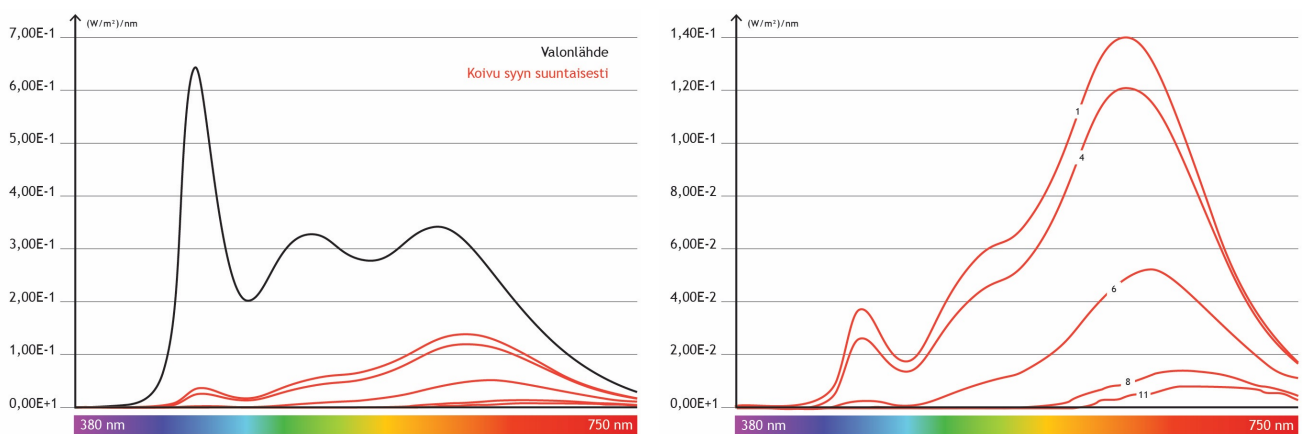
Kuvio 2. Koivun läpäisseen valon intensiteetti paksuuden funktiona

Valokuvissa koivusta valon värin muutos puussa näkyy ehkä kokeilluista lajeista parhaiten. Valon väri muuttuu neutraalista valonlähteestä keltaisen ja oranssin sävyjen kautta punaiseen. Paksuimmissa kappaleissa väri on voimakkaan punainen, mutta valoa pääsee enää niin vähän lävitse, että väri ei ole havaittavissa kuin pimeässä tilassa. (Kuva 5)

Valon värin muutosta tarkasteltiin myös mittaamalla. (Kuviot 3 ja 4) Samaan kaavioon on laitettu aallonpituuskäyrät useammasta koivun paksuudesta. Käyrät on numeroitu ja numeroita vastaavat paksuudet voi tarkistaa liitteenä olevasta taulukosta. Numero



Kuvio 3. Koivun aallonpituusjakaumat valon kulkiessa poikkisyyntä suuntaisesti



Kuvio 4. Koivun aallonpituusjakaumat valon kulkiessa syyn suuntaisesti

yksi on aina ohuin kappale. Vasemmalla olevaan kuvaajaan aallonpituuskäyrät on suhteutettu käytetyn valonlähteen aallonpituuskäyrään ja oikealla olevassa kuvaajassa asteikko on sopivampi tarkempaan tarkasteluun. Kaaviossa x-akselilla on kuvattuna näkyvän valon aallonpituudet niitä vastaavina väreinä ja y-akselilla on jokaista aallonpituutta vastaava valon intensiteetti.

Aallonpituuskuvaajista näkee selkeästi, että koivun molemmat syysuunnat absorboivat valosta erityisesti sinisiä ja vihreitä aallonpituuksia. Jopa kaikista ohuimmat kappaleet poistavat lähes kokonaan Led-valolle tyypillisen piikin sinisten aallonpituuksien kohdalla. Tietyn paksuuden jälkeen valossa on jäljellä enää punaista aallonpituutta. Saman tiedon kuitenkin voi päätellä myös valokuvien perusteella, joten värimittauksista saatu tieto ei ole kovin hyödyllistä.

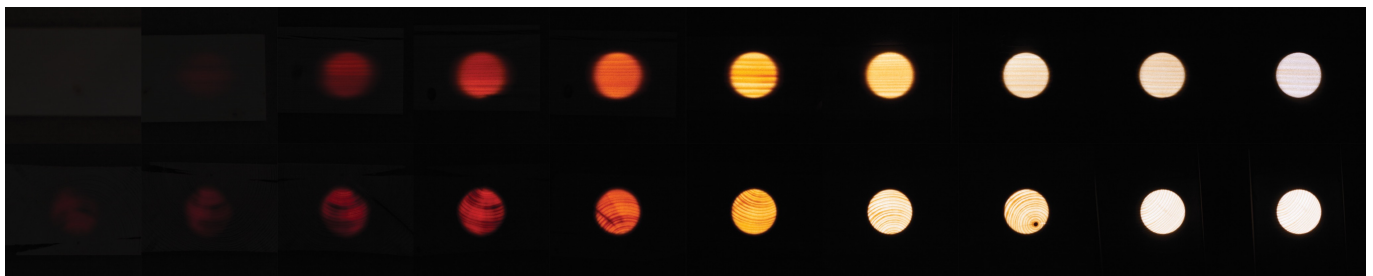
Koivun valokuvia ottaessa havaitsin myös, että saman kappaleen eri kohdissa valonläpäisy saattaa olla hyvinkin erilainen. Erityisen hyvin tämän huomasi valon

kulkiessa kappaleessa syyn suuntaan. Kuvassa 6 samalla rivillä on sama kappale, mutta valo on asetettu eri kohtiin puuta. Valo läpäisi puun sitä huonommin mitä lähempänä puun ydintä oltiin. Puu on tiheimmillään lähempänä ydintä, joten sieltä valoa pääsee vähemmän läpi. Sama ilmiö saattaa toistua myös valon kulkiessa poikkisuuntaan, mutta mittaukseen käytetyillä kappaleilla sitä ei voi todistaa. Myös puulajikohtaisesti ja jopa yksilökohtaisesti tässä saattaa olla eroja, sillä puun kasvu riippuu monesta tekijästä. Kuitenkin olettaisin, että jos haluaa mahdollisimman läpikuultavan kappaleen, kannattaa hyödyntää lähempänä puun kuorta olevaa puumateriaalia.



Kuva 6. Etäisyys puun ytimestä kasvaa oikealle.

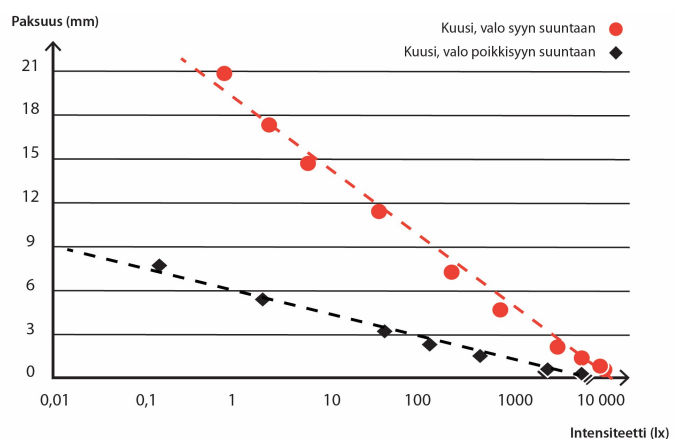
3.3 Kuusi



Kuva 7. Valokuvat kuusesta

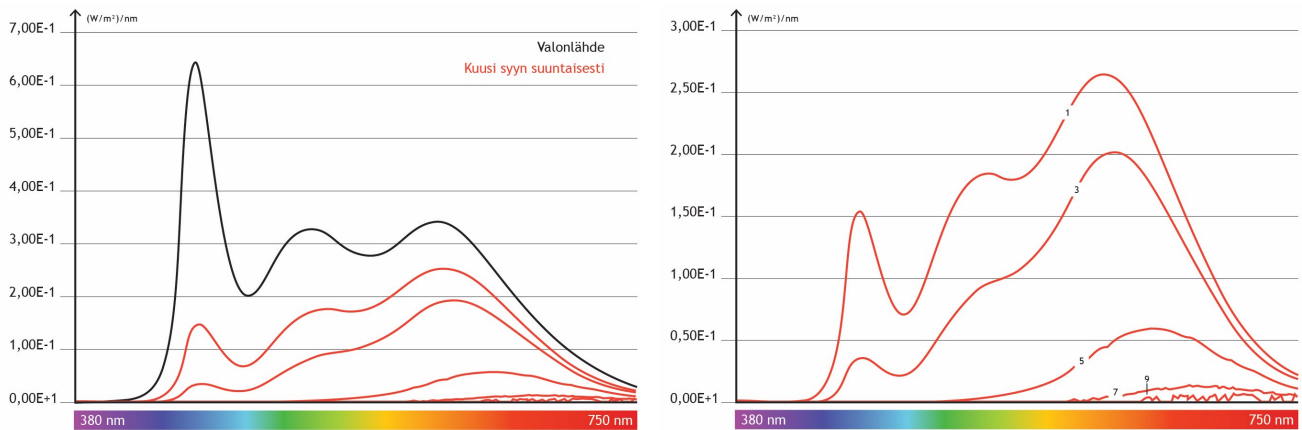
Kuusi yllätti suuresti läpikuultavuudellaan ollen molemmissa syysuunnissa kokeilluista lajeista paras. Syynsuuntaisesti jopa 2,1 senttimetrin paksuisesta kappaleesta tuli havaittavissa oleva määrä valoa läpi. (Kuvio 3) Myös kuudessa värin muutos muodosti paksuuden kasvaessa kauniin liukuvärin keltaisesta punaiseen. (Kuva 7)

Kuusen aallonpituusjakaumasta syynsuuntaisesti (Kuvio 4) nähdään, että ohuimmat kappaleet (1, 3) ovat vielä



Kuvio 3. Kuusen läpäisseen valon intensiteetti paksuuden funktiona

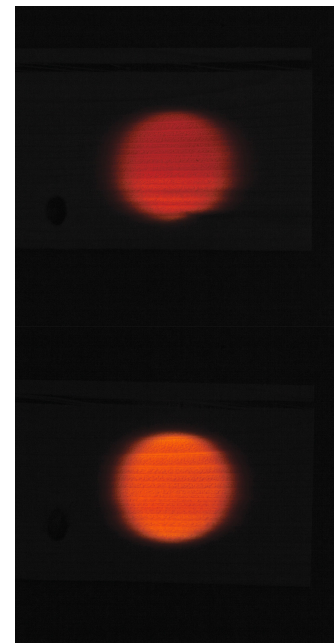
hyvin vertailukelpoisia valonlähteen kanssa. Värimuutos ei ole näissä kappaleissa kovin raju vaikka suurin sinisen aallonpituuden piikki madaltuuikin huomattavasti.



Kuvio 4. Kuusen aallonpituusjakaumat valon kulkiessa syyn suuntaisesti

Myös valon kulkiessa toiseen syysuuntaan tulokset olivat hyvin samankaltaisia. Kuusesta leikatuissa ohuemmissa kappaleissa positiivista oli myös se, että ne eivät käyristyneet ollenkaan sahauksen jälkeen tai varastoinnissa toisin kuin muiden lajien ohuimmat lastut.

Kuusessa valon pystyi selkeästi näkemään säteilevän ja heijastelevan puun sisällä. Tämä teki kuusen valokuvioista pehmeän näköisen ja syykuvioista hieman samean. (Kuva 8) Parhaiten valon säteily puun syitä pitkin näkyy valon kulkiessa poikkisyyn suuntaisesti paksummissa kappaleissa. Pyöreästä reiästä läpi tullut valo leviää syitä pitkin soikion muotoiseksi alueeksi, jossa on pehmeät reunat.



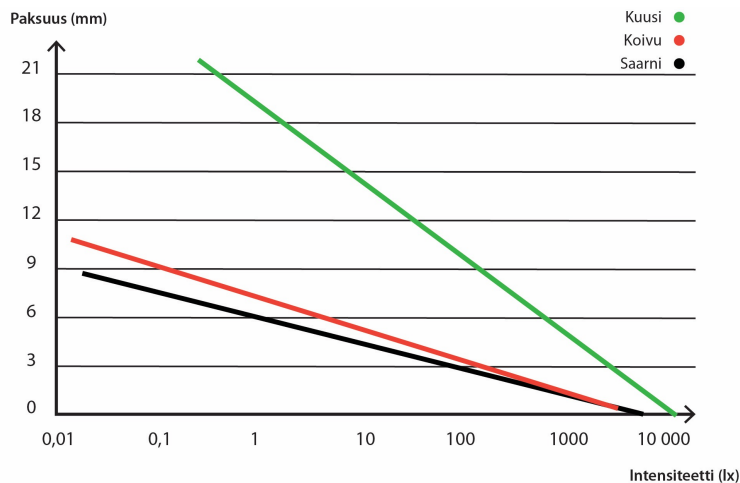
Kuva 8. Valon leviäminen syitä pitkin

3.4 Puulajien vertailua

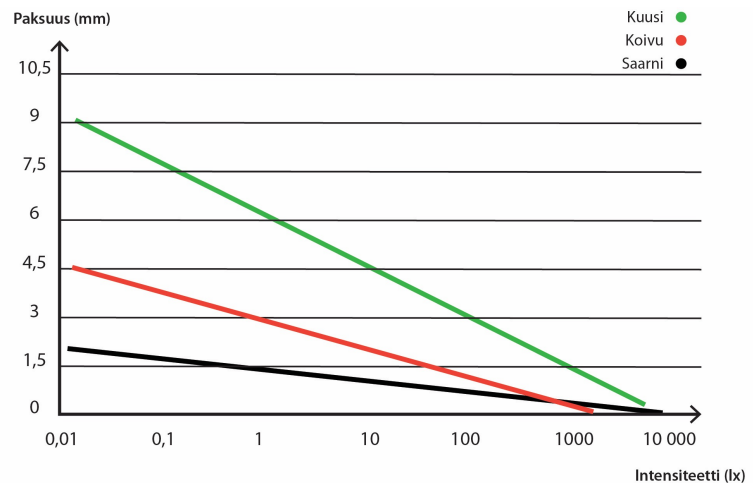
Kuusi on monessa suhteessa paras vertailussa olleista lajeista. Valonläpäisevyys varsinkin syyn suuntaisesti oli omaa luokkaansa lehtipuihin verrattuna. (Kuvio 4)

Kysymys kuuluukin johtuiko kuusen paremmuus nimenomaan havupuun ominaisuuksista ja voidaanko olettaa, että muutkin havupuut olisivat paremmin valoa läpäiseviä kuin lehtipuut. Havupuille tyypillinen pihkaisuus saattaa selittää kuusen läpikuultavuutta. Kuusessa on myös hyvin suorat syyt, mutta se ei selitä paremmuutta valon kulkiessa syihin nähden poikittain. (Kuvio 5) Toisaalta kuusen tiheys oli myös pienempi kuin koivulla ja saarnella.

Värimuutos oli lajeissa suhteellisen samanlainen. Saarni ei muodostanut niin helposti havaittavaa liukuväriä, mutta oli muuten mielenkiintoinen tekstuuriltaan raitaisen syykuvionsa ja reikiensä vuoksi. Saarnessa valo ei levinnyt sivuille syitä pitkin toisin kuin koivussa ja kuusessa.



Kuvio 4. Valon läpäisy syyn suuntaisesti eri lajeissa



Kuvio 5. Valon läpäisy poikkisyyn suuntaisesti eri lajeissa

4 Päätelmät

Tutkimuksesta voidaan vetää monenlaisia johtopäätöksiä siitä, mitkä asiat saattavat vaikuttaa puun läpikuultavuuteen.

Ensinnäkin syysuunnan vaikutus valonläpäisevyyteen on todistettu ja pätee kaikkiin puulajeihin, sillä se perustuu puun rakenteeseen, joka on lajista riippumatta aika samanlainen. Lukuunottamatta kaikista ohuimpia kappaleita valon kulkiessa syyn suuntaisesti, valon intensiteetti vähintään kaksinkertaistui verrattuna saman paksuiseen kappaleeseen, jossa valo kulkee syyhyn nähden poikittain. Tutkimuksessa ei kokeiltu muita syysuuntia, mutta voisi olettaa, että 45 asteen syysuuntaan valonläpäisy olisi noin puolessa välissä tässä kokeessa olleita syysuuntia.

Mielenkiintoinen tulos oli myös se, että puun tiheys vaihtelee puun ytimen ja kuoren välillä niin paljon, että sillä saattaa olla suurta merkitystä kappaleen läpikuultavuuteen. Puun ulkokuorta lähempänä olevia kappaleita kannattaa yrittää hyödyntää jos haluaa toteuttaa jotain hyvin läpikuultavaa puusta.

Valon ja samaten puukappaleen havaittu väri muuttuu paksuuden kasvaessa keltaisen ja oranssin kautta punaiseen. Havaitut värit saattavat olla yllättävänkin voimakkaita varsinkin jos valonlähde on tarpeeksi kirkas.

Havupuut saattavat olla ominaisuuksiltaan lehtipuita parempia läpikuultavuuden kannalta. Kuitenkin useampien puulajien tutkiminen olisi tämän todistamiseen tarpeen.

Tutkimuksen seuraava vaihe olisi selvittää miten erilaiset käsittelyt, kuten öljyäminen parantaisivat puun läpikuultavuutta.

Lähdeluettelo

http://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html

Pekka Saranpää, 2005, <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/Saranpaa.pdf>

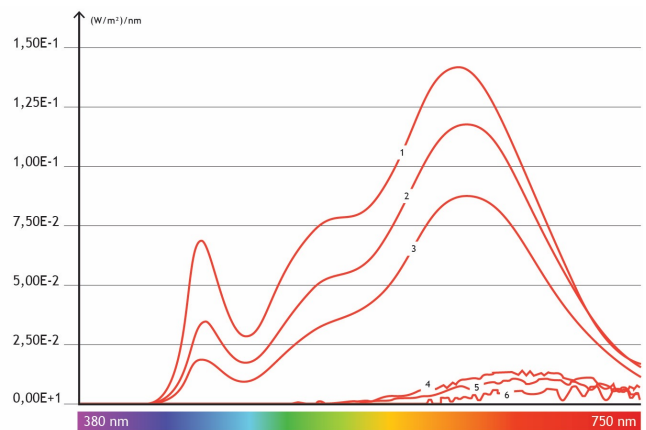
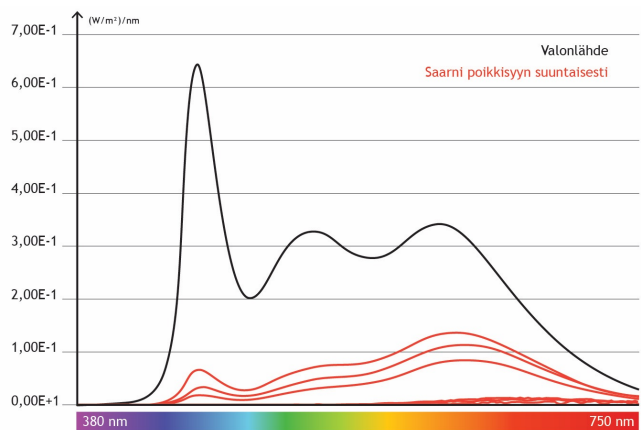
Liitteet

Taulukoissa sarakkeessa # oleva numero vastaa numeroita aallonpituustaulukoissa ja myös valokuvasarjoissa siten, että numero 1 on oikeanpuoleisin kuva sarjassa.

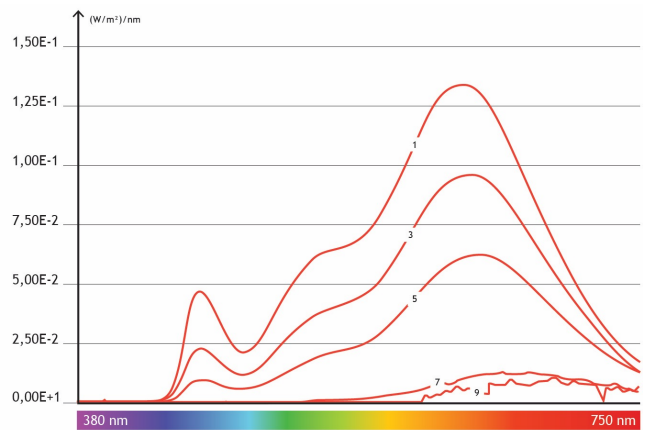
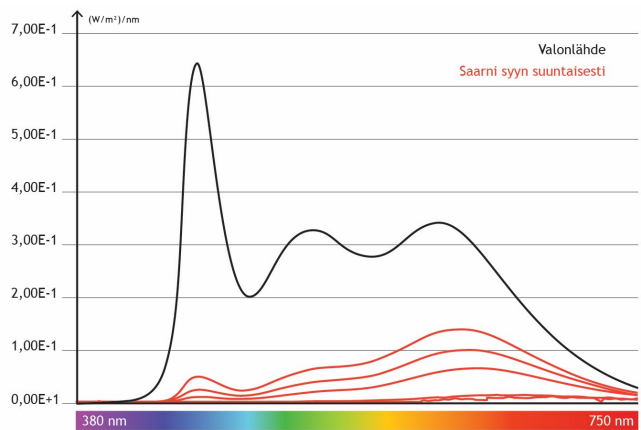
SAARNI					
Valo syyn suuntaisesti			Valo poikkisyyn suuntaisesti		
#	Paksuus (mm)	E (lx)	#	Paksuus (mm)	E (lx)
1	0,33	4929,2	1	0,16	6386,1
2	0,48	2957,4	2	0,16	4664,8
3	0,48	3179,2	3	0,18	3215,1
4	0,56	2297,2	4	0,59	119,17
5	0,6	1785,9	5	0,71	65,229
6	1,05	1686,3	6	0,87	12,071
7	1,86	163,63	7	1,38	0,3415
8	1,94	125,8	8	1,41	1,4308
9	2,95	22,409	9	2,08	0
10	4,74	1,1676	10	2,3	0
11	5,7	0,3047	11	3,51	0
12	8,52	0	12	4,92	0
13	12,44	0	13	5,94	0
14	16,42	0			

KOIVU					
Valo syyn suuntaisesti			Valo poikkisyyn suuntaisesti		
#	Paksuus (mm)	E (lx)	#	Paksuus (mm)	E (lx)
1	0,37	4731,7	1	0,33	1358,5
2	0,41	5335,4	2	0,39	936,34
3	0,42	5498,1	3	0,4	1214,6
4	0,44	3973,9	4	0,48	719,1
5	0,83	1391	5	1	11,062
6	1	1136,3	6	1,33	13,186
7	1,45	599,51	7	3	0,0843
8	2,18	100,53	8	4	0
9	2,4	124,46	9	6,28	0
10	2,83	42,132	10	9,2	0
11	3,35	20,232	11	11,93	0
12	4,2	15,26	12	15,4	0
13	5,91	3,3498			
14	6,7	1,8314			
15	9,2	0,1963			

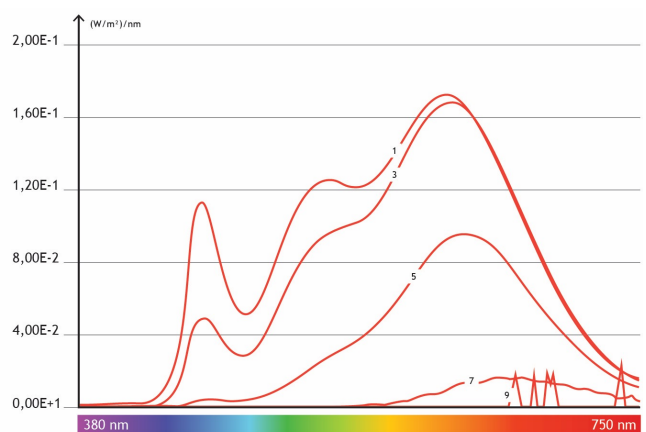
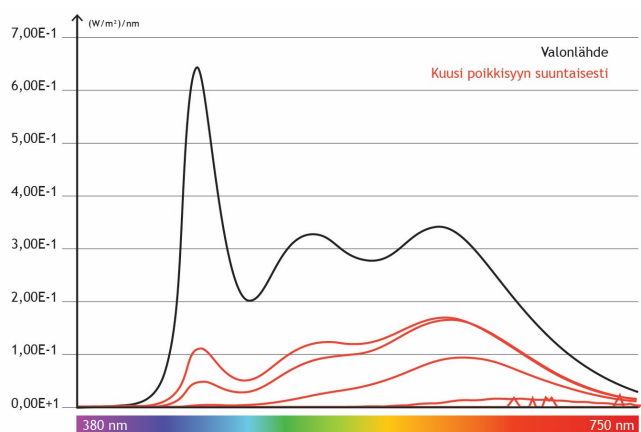
KUUSI					
Valo syyn suuntaisesti			Valo poikkisyyn suuntaisesti		
#	Paksuus (mm)	E (lx)	#	Paksuus (mm)	E (lx)
1	0,5	13197	1	0,29	8767,6
2	0,6	12426	2	0,45	8270,4
3	1,24	7943,2	3	0,51	7717,6
4	2,2	4062,4	4	0,86	2842,6
5	4,7	918,86	5	1,02	2990,4
6	7,25	270,67	6	1,89	542,22
7	11,51	41,573	7	2,65	144,88
8	14,85	6,6488	8	3,5	46,476
9	17,52	2,4521	9	5,6	2,0039
10	21	0,7846	10	7,8	0,1434



Saarnen aallonpituusjakaumat valon kulkiessa poikkisyyn suuntaisesti



Saarnen aallonpituusjakaumat valon kulkiessa syyn suuntaisesti



Kuusen aallonpituusjakaumat valon kulkiessa poikkisyyn suuntaisesti